

УДК 621.192.3

Г. В. Кузнецов, Е. В. Кравченко

**ВЛИЯНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ СИСТЕМЫ  
"ПОЛИМЕР–ПОЛУПРОВОДНИК–КОМПОЗИТ"**

*Проведен численный анализ влияния СВЧ-излучения на тепловой режим элементов электронной аппаратуры (ЭА). Исследования показали, что температурное поле системы "полимер–полупроводник–композит" при таком воздействии является неоднородным. Установлено, что в достаточно типичных условиях работы с повышением напряженности электрического поля происходит значительное увеличение (с 362 до 387 К) максимальной температуры моделируемого объекта. Такое существенное влияние СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" сопоставимо с ростом внешней температуры на 20 К или увеличением тепловыделения внутреннего источника на 30%.*

**Ключевые слова:** радиоизлучение, СВЧ-нагрев, нестационарный тепловой режим, численное моделирование, метод конечных разностей.

**Введение.** Высокая степень интеграции устройств современной электронной аппаратуры (ЭА) на единицу площади, а также миниатюризация электрорадиоэлементов (ЭРЭ) совместно с радиоизлучениями различного происхождения приводят к интенсификации тепловых нагрузок на отдельные ЭРЭ [1, 2]. Наряду с известными положительными свойствами волн сверхвысокой частоты (СВЧ) и применением их в различных отраслях [3–6], СВЧ-излучение оказывает негативное воздействие (например, на ЭА при "нормальных" условиях эксплуатации) [1, 7, 8]. Результатом являются [1, 8]: нарушение теплового режима приборов, электромагнитные помехи, деструкция материалов и функциональные сбои. Прогнозирование температурных полей ЭРЭ в условиях воздействия СВЧ-излучений имеет большое значение при анализе надежности устройств ЭА.

Важным этапом при исследовании влияния СВЧ-излучения на тепловой режим элементов ЭА является выбор элементарных моделей (структур), которые, с одной стороны, должны быть наиболее используемыми, а с другой, восприимчивыми к такому воздействию [9].

При производстве широкого круга радиотехнических приборов (микропроцессоры, микроконтроллеры, интегральные микросхемы и т. д.) применяются полимеры [10, 11]. Без использования полимерных композиционных материалов (пластмасс, компаундов, слоистых пластиков) практически невозможно реализовать современное электронное устройство. В результате воздействия волн СВЧ в полимерных и полупроводниковых структурах ЭА происходит диэлектрический или СВЧ-нагрев [1]. Величина тепловыделения, обусловленного радиоизлучением, зависит от параметров электромагнитного поля (значения напряженности, частоты, направленности вектора напряженности и т. д.), электрических и теплофизических характеристик используемых материалов [12, 13]. Так, например, диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ) применяемых при производстве ЭА материалов изменяется в диапазоне от 1 до 12 [13]. Очевидно также, что тепловой режим структур типа "полимер–полупроводник" в условиях СВЧ-нагрева является нестационарным.

Работа внутреннего тепловыделяющего элемента — полупроводникового кристалла — приводит к тому, что температурное поле самих ЭРЭ является существенно неоднородным [14]. Поэтому для исследования воздействия СВЧ-излучения на тепловой режим работы целесообразен выбор характерного для широкого круга ЭА объекта. Таким, например, является печатный узел, который состоит из композиционного конструктивного материала и ЭРЭ в пластиковом корпусе [1, 8, 11].

Кроме непосредственного нарушения теплового режима работы ЭА при воздействии СВЧ-излучений, волны СВЧ создают электромагнитные помехи, приводящие к тепловому пробую и ускорению процесса деградации полупроводниковых и полимерных структур [16, 17].

Электромагнитные помехи могут приводить к функциональным отказам микросхем типа КМОП (КМОП — комплементарная структура "металл-оксид-полупроводник") вследствие эффекта "защелкивания" ("тиристорная защелка") [17]. Отказ ЭРЭ происходит в результате выгорания, металлизации или теплового пробоя внутренних полупроводниковых структур под действием импульсного тока, переводящего "защелку" в положение "включено" на достаточно долгое время [17]. Подобные явления наблюдаются в микросхемах и при воздействии нейтронов [18].

Процесс пробоя (теплового или электрического) полимерных материалов связан с потерей электрической прочности (предварительная стадия) и их дальнейшим разрушением (заключительная фаза) [13]. Известно [13], что электрическая прочность полярных полимеров уменьшается в 4 раза (при повышении температуры до 400 К), а у неполярных приблизительно в 2 раза в том же диапазоне температур. При этом тепловое воздействие СВЧ-помех зависит от взаимной ориентации вектора напряженности электрического поля (поляризация) и пространственного расположения корпуса ЭРЭ [9]. На основании результатов работ [9, 17] можно сделать вывод, что электромагнитные помехи создают предпосылки для теплового пробоя в структурах "полимер-полупроводник".

Скорость деструкции полупроводниковых и полимерных композиционных материалов существенно зависит от температуры и параметров электромагнитного излучения [12, 15, 16]. Согласно кинетической концепции С. Н. Журкова [19], разрушение полимеров происходит в результате теплового движения в материале. Термофлуктуационный механизм деструкции состоит в совместном действии тепловых колебаний и напряжений. Температура в уравнении Журкова [19] является важнейшим фактором, а долговечность полимерного материала зависит от нее экспоненциально. Известно [20], например, что даже единичный короткий импульс приводит к саморазогреву и деградации полупроводниковой структуры приборов. Также установлено, что перепады температур по системам типа "полимер-полупроводник" при эксплуатации ЭА в диапазоне умеренных рабочих температур могут достигать 20–30 К [14, 21].

Анализ влияния СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер-полупроводник-композит" возможен на основе моделирования совместно протекающих процессов нестационарного СВЧ-нагрева и тепловыделения кристаллов ЭРЭ.

#### **Математическое моделирование СВЧ-нагрева в диэлектрических и полупроводниковых материалах.**

В результате воздействия на диэлектрик внешнего электромагнитного поля происходит необратимое рассеивание некоторой части энергии в материале [22]. Совокупность параметров, определяющих диэлектрические потери (диэлектрическая проницаемость, тангенс диэлектрических потерь), и характер внешнего СВЧ-излучения (частота, напряженность электромагнитного поля, поляризованность) определяют состояние полимеров [11, 12, 22].

Методы математического моделирования СВЧ-нагрева формально можно разделить на аналитические и численные. Так, например, получены аналитические решения задачи нагрева слоя диэлектрика плоской электромагнитной волной [22, 23] с учетом линейной [24] и произвольной зависимостей коэффициента затухания от температуры [25] в одномерной постановке. Разработаны математические модели СВЧ-нагрева диэлектрического слоя конечной толщины, соответствующие разным способам возбуждения и условиям распространения электромагнитного поля [26], а также декомпозиционная математическая модель распространения электромагнитных волн в наноструктурированных композитах [27].

Аналитические методы решения [22–27] применимы лишь для ограниченного круга задач, так как они не учитывают нестационарность температурных полей, например, в структуре "полимер-полупроводник-композит", а также пространственную неоднородность температур в результате совокупного влияния СВЧ-излучения и тепловыделения локальных источников, например, полупроводниковых кристаллов ЭРЭ.

Численное решение систем уравнений (Максвелла и теплопроводности) осуществляется с использованием методов конечных объемов [28], конечных элементов [29], конечных разностей во временной области [30]. Поглощенная материалами мощность СВЧ-излучения превращается в теплоту и рассчитывается на основе теоремы Пойнтинга [29–31].

**Методы анализа температурных полей при наличии локальных источников тепловыделения.** Основой современных методов анализа тепловых режимов устройств ЭА является моделирование с использованием различных программных комплексов (например, Flow Vision) [32]. Известны и иные подходы: упрощенные математические модели [33–35], метод тепловых схем (теплового сопротивления) [36, 37], тепловизионного мониторинга [38], метода конечных элементов [37], конечно-разностных методов [39] при учете естественной конвекции [40] совместно с теплоотводом излучением [41] в стационарном [42] и циклическом режимах работы [43].

На основании анализа результатов работ [22–43] можно сделать вывод, что определение масштабов влияния СВЧ-излучения на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" возможно только на основе численного моделирования нестационарных температурных полей, формирующихся в результате взаимосвязанных процессов СВЧ-нагрева и тепловыделения от локальных ЭРЭ.

**Постановка задачи.** Постановка задачи (рис. 1) типична для широкого круга электрорадиоэлементов (микросхемы, транзисторы, диоды, силовые полупроводниковые приборы) и применяемых материалов (таблица).

Моделирование температурного поля с учетом влияния СВЧ-нагрева на тепловой режим системы "полимер–полупроводник–композит" проведено в диапазоне рабочих температур окружающей среды в плоскости  $XOY$ .

В двумерной постановке задача теплопереноса сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности:

$$C(x, y) \rho(x, y) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(x, y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_{\text{ист}}(t, x, y) + Q_{\text{свч}}(t, x, y). \quad (1)$$

При задании начальных условий считалось, что температура в начальный момент времени распределена равномерно:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y). \quad (2)$$

В граничных условиях учитывался конвективный и радиационный теплообмен:

$$x = 0, \quad y \in [0; L_y] : -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T) (T_b - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_b^4 - T^4), \quad (3)$$

$$x = L_x, \quad y \in [0; L_y] : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T) (T_b - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_b^4 - T^4), \quad (4)$$

$$y = 0, \quad x \in [0; L_x] : -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T) (T_b - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_b^4 - T^4), \quad (5)$$

$$y = L_y, \quad x \in [0; L_x] : \lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T) (T_b - T) + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma (T_b^4 - T^4). \quad (6)$$

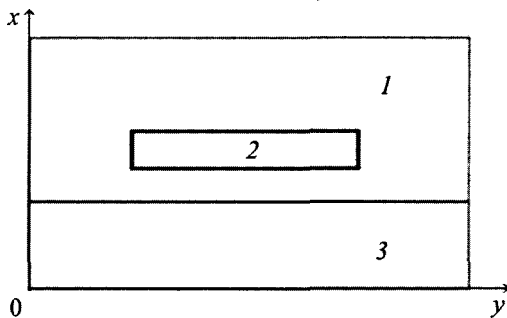


Рис. 1. Область решения задачи моделирования температурных полей в системе "полимер–полупроводник–композит": 1 — полимерный материал; 2 — полупроводниковый (кристалл) элемент; 3 — композиционный материал (стеклотекстолит)

#### Электрические и теплофизические параметры модели

Материал	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость $C$ , Дж/(кг·К)	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ , $10^{-3}$	Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon$
Полимерный материал	1200	1000	0.3	0.2	2.2
Полупроводник (кремний)	3000	733	109	1	12
Композит (стеклотекстолит)	1750	990	0.3	30	6

Коэффициент конвективного теплообмена  $\alpha(T)$  зависит от температуры и определяется для каждой точки поверхности [44]:

$$\alpha(T) = (1.42 - 1.4 \cdot 10^{-3} T_c) N \left( \frac{T - T_b}{L} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (7)$$

Приведенный коэффициент черноты поверхности изделия и окружающей среды  $\epsilon_{пр}$  определяется соотношением [44]:

$$\epsilon_{пр} = \left( \frac{1}{\epsilon_{п}} + \frac{1}{\epsilon_{окр}} - 1 \right)^{-1}. \quad (8)$$

Интенсивность тепловыделения при СВЧ-воздействии [45]:

$$Q_{свч}(t, x, y) = 2\pi\epsilon_0\epsilon \operatorname{tg}(\delta) f E^2. \quad (9)$$

Диапазон СВЧ-излучения ( $f = 3\text{--}7$  ГГц) и значения напряженности электрического поля ( $E = 600\text{--}1900$  В/м) в выражении (9) выбраны исходя из экспериментальных данных [46–48].

При постановке задачи сделаны следующие допущения:

1. Теплофизические и электрические характеристики материалов (таблица) структуры не зависят от температуры.
2. Тепловой контакт между элементами структуры считается идеальным.
3. Затухание СВЧ-излучения не учитывается.

Метод решения дифференциального уравнения (1) аналогичен [39–43].

**Результаты и обсуждение.** Характерный вид температурного поля системы "полимер-полупроводник-композит" в результате СВЧ-нагрева при температуре окружающей среды  $T_b = 27^\circ\text{C}$  в момент времени  $t = 100$  с показан на рис. 2.

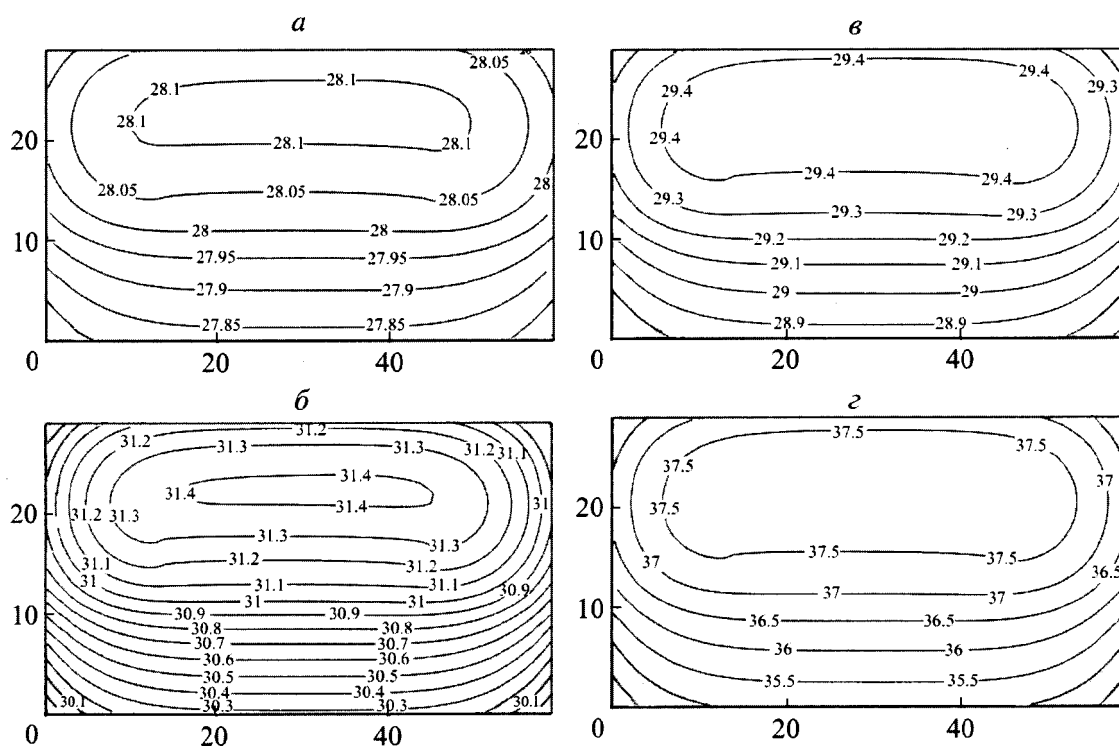


Рис. 2. Температурное поле системы "полимер-полупроводник-композит" при воздействии СВЧ-излучения: а —  $E = 600$  В/м; б — 1200; в — 900; г — 1900

Численные исследования теплового режима структуры "полимер-полупроводник-композит" проводились для частоты 3 ГГц без учета тепловыделения внутреннего источника (рис. 2). Анализ результатов показал, что увеличение значения вектора напряженности до  $E = 1900$  В/м приводит к росту температуры по структуре на 10 и более градусов (рис. 2, з), а температурное поле моделируемого объекта является существенно нестационарным. Необходимо отметить, что ресурс (надежность) радиотехнических приборов существенно зависит от температуры, при которой они работают. Известно, что интенсивность отказов ЭА увеличивается в 2 раза при повышении температуры на 10 К в диапазоне рабочих температур [49]. Поэтому численные исследования влияния СВЧ-излучения на тепловой режим работы системы "полимер-полупроводник-композит" целесообразно проводить для двух значений напряженности электрического поля (1200 и 1900 В/м).

Тепловой режим системы "полимер-полупроводник-композит" в результате совместного влияния СВЧ-нагрева и тепловыделения внутреннего источника иллюстрирует рис. 3. Следует отметить, что температурное поле структуры является существенно неоднородным, а градиенты температуры по оси  $OY$  достигают 60 К.

Результаты численного исследования влияния СВЧ-излучения в диапазоне частот 3–7 ГГц на тепловой режим структуры приведены для средней по объему (кривые 2–5 на рис. 4, а) и максимальной расчетной температуры (кривые 7–10 на рис. 4, а). Температурные зависимости 1 и 6 на рис. 4, а получены без учета воздействия СВЧ-нагрева при прочих равных условиях. Анализ зависимостей  $T_{cp}(t)$  (кривые 1–5 на рис. 4, а) показывает, что с ростом частоты электромагнитного излучения средняя температура по системе "полимер-полупроводник-композит" увеличивается на 3 К (кривая 2, рис. 4) и на 10 К (кривая 5, рис. 4, а). Полученные зависимости характеризуют вклад СВЧ-нагрева в интенсификацию тепловой нагрузки по исследуемой структуре и хорошо согласуются с прогнозируемым температурным полем (рис. 2, б) при напряженности  $E = 1200$  В/м и  $f = 3$  ГГц.

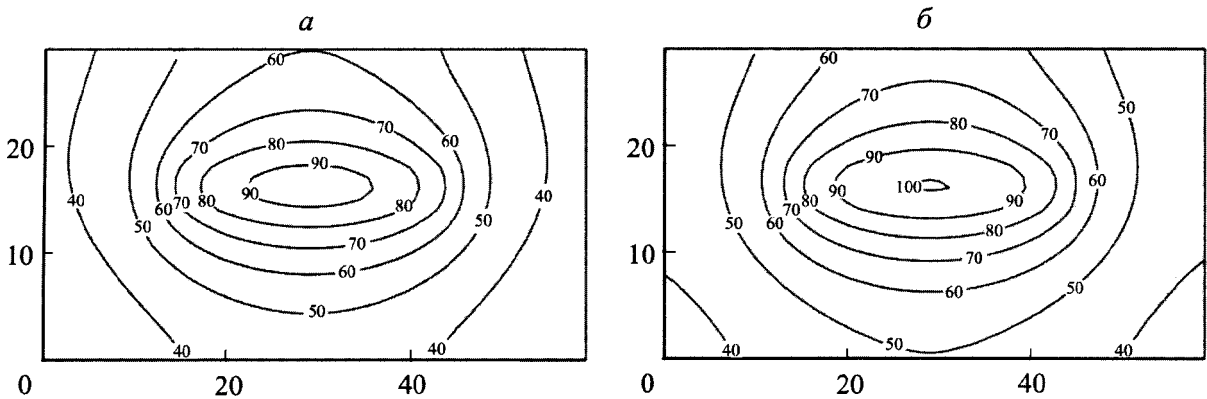


Рис. 3. Температурное поле системы "полимер-полупроводник-композит" при  $Q_{\text{ист}} = 1$  Вт и  $f = 3$  ГГц: а —  $E = 1200$  В/м; б — 1900

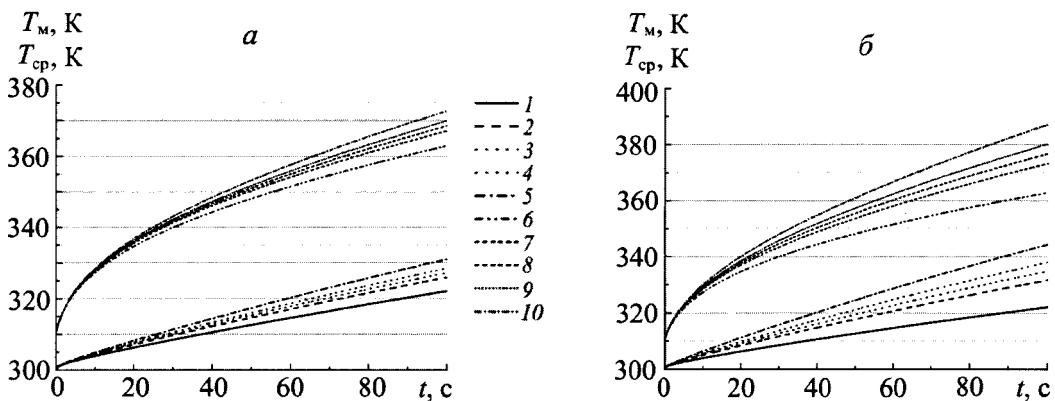


Рис. 4. Температурные зависимости системы "полимер-полупроводник-композит" при  $E = 1200$  (а) и 1900 В/м (б): 1 и 6 — без СВЧ-нагрева; 2 и 7 —  $f = 3$  ГГц; 3 и 8 — 4; 4 и 9 — 5; 5 и 10 — 7

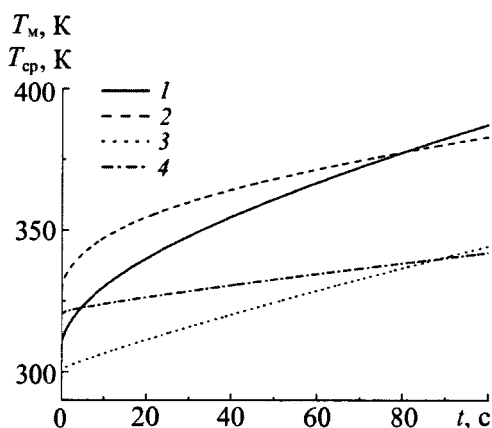


Рис. 5. Изменения характерных температур системы "полимер-полупроводник-композит" с ростом времени: 1, 3 —  $T_m$  и  $T_{cp}$  при  $E = 1900$  В/м,  $f = 7$  ГГц,  $T_b = 300$  К; 2, 4 —  $T_m$  и  $T_{cp}$  без СВЧ-нагрева при  $T_b = 320$  К

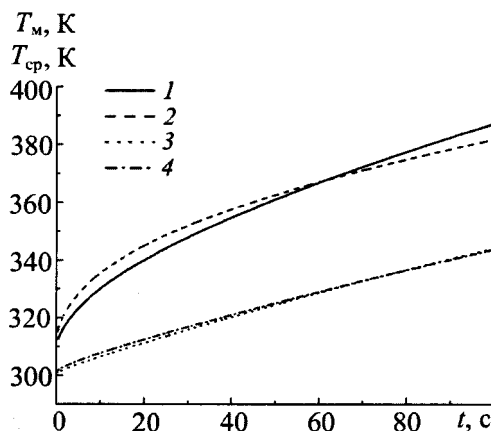


Рис. 6. Изменения характерных температур системы "полимер-полупроводник-композит" с ростом времени: 1, 3 —  $T_m$  и  $T_{cp}$  при  $E = 1900$  В/м и  $Q_{ист} = 1$  Вт; 2, 4 —  $T_m$  и  $T_{cp}$  без СВЧ-нагрева при  $Q_{ист} = 1.3$  Вт

Абсолютная максимальная температура системы "полимер-полупроводник-композит" с возрастанием частоты с 3 ГГц (кривая 7, рис. 4, а) до 7 ГГц (кривая 10, рис. 4, а) увеличивается с 367 до 372 К соответственно. Сравнение показывает, что  $T_m$  структуры (кривая 6, рис. 4, а) без СВЧ-нагрева равна 362 К при  $t = 100$  с.

С увеличением напряженности электрического поля до 1900 В/м в исследуемой системе "полимер-полупроводник-композит" происходит резкое увеличение как средних (кривые 2–5, рис. 4, б), так и максимальных температур (кривые 7–10, рис. 4, б). Например, для времени моделирования  $t = 100$  с максимальная температура (кривая 10 на рис. 4, б) выше на 25 К по сравнению с  $T_m$  (кривая 6 на рис. 4, б) без учета влияния СВЧ-излучения.

Проблематика прогнозирования тепловых режимов нашла применение в двух перспективных методологиях, связанных с разработкой (PDfR — Probabilistic Design for Reliability [50]) и эксплуатацией (DRM — Dynamic Reliability Management [51]) устройств современной ЭА. Суть этих концепций заключается в определении наиболее значимых ключевых факторов, влияющих на эксплуатационный ресурс ЭРЭ, с последующей разработкой математических моделей, основанных на физике отказов. С целью сравнительного анализа степени влияния СВЧ-нагрева на тепловой режим системы "полимер-полупроводник-композит" были проведены исследования с анализом роста внешней температуры в диапазоне умеренных рабочих  $T_b$  (рис. 5) и тепловыделения внутреннего источника (рис. 6).

Температурные зависимости для максимальных (кривая 2, рис. 5) и средних по объему температур (кривая 4, рис. 5) без СВЧ-нагрева при  $T_b = 320$  К, а также при воздействии электромагнитных волн, представлены на рис. 5. Анализ результатов численных исследований показывает, что в начальном временном интервале (до 40 с) есть существенные расхождения в абсолютных значениях  $T_m$  и  $T_{cp}$ . Однако при  $t = 100$  с отличия в оценках температур не такие большие и составляют от 2 (кривые 3, 4 на рис. 5) до 5 К (кривые 1, 2 на рис. 5).

Результаты численных исследований теплового режима системы "полимер-полупроводник-композит" с увеличением тепловыделения внутреннего источника представлены на рис. 6. Анализ температурных зависимостей  $T_m$  (кривые 1 и 2 на рис. 6) и  $T_{cp}$  (кривые 3 и 4 на рис. 6) показывает, что СВЧ-воздействие сопоставимо с повышением тепловыделения кристалла ЭРЭ (область 2 на рис. 1) на 30%.

Полученные зависимости характерных температур от времени для системы "полимер-полупроводник-композит" (рис. 4–6) достаточно хорошо согласуются с априорными инженерными представлениями о теплопроводности твердых тел и позволяют сделать вывод о существенном влиянии СВЧ-излучения на тепловой режим электронной аппаратуры.

## Выводы

1. Впервые решена нестационарная задача СВЧ-нагрева системы "полимер–полупроводник–композит". Показано, что температурное поле структуры является существенно неоднородным, а градиенты температуры достигают 60 К.

2. Впервые показаны диапазоны изменения средних и максимальных температур в результате СВЧ-воздействия. Установлено, что при  $E = 1900$  В/м в диапазоне частот 3–7 ГГц температура увеличивается от 10 до 25 К.

3. Численные исследования теплового режима системы "полимер–полупроводник–композит" показали, что воздействие волн СВЧ-диапазона сопоставимо с увеличением температуры внешней среды на 20 К или повышением тепловыделения ( $Q_{\text{ист}}$ ) на 30%.

4. Прогнозирование температурных полей электронных приборов (транзисторов, микросхем, микроконтроллеров и т. д.) в результате воздействия волн СВЧ можно проводить по результатам численного анализа реальных нестационарных режимов работы устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-38-50595/15).

## Обозначения

$C$  — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $E$  — напряженность электрического поля, В/м;  $f$  — частота СВЧ-излучения;  $L$  — определяющий размер поверхности, м;  $N$  — коэффициент, зависящий от ориентации поверхности в пространстве;  $Q_{\text{ист}}$ ,  $Q_{\text{свч}}$  — тепловыделения источника и за счет СВЧ-нагрева, Вт;  $t$  — время, с;  $T$  — температура, К;  $T_0$  — начальная температура, К;  $T_{\text{в}}$ ,  $T_{\text{м}}$  — температуры окружающей среды и максимальная температура модели, К;  $T_{\text{с}}$  — среднее арифметическое температур поверхности модели и внешней среды, К;  $T_{\text{ср}}$  — средняя температура по модели, К;  $\text{tg } \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — координаты;  $\alpha(T)$  — коэффициент конвективного теплообмена поверхности элемента ЭА с внешней средой, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\epsilon_{\text{пр}}$  — приведенный коэффициент черноты поверхности и окружающей среды;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

## Литература

1. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Обратимые отказы интегральных микросхем в полях радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 1. С. 3–24.
2. Tilley B. S. On microchannel shapes in liquid-cooled electronics applications. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 62 (1). Pp. 163–173.
3. Саломатов В. В., Сладков С. О., Пашенко С. Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85, № 3. С. 535–549.
4. Акулич П. В., Темрук А. В., Акулич А. В. Моделирование и экспериментальное исследование тепло- и влагопереноса при СВЧ-конвективной сушке растительных материалов. *Инженерно-физический журнал*. 2012. Т. 85, № 5. С. 951–958.
5. Гринчик Н. Н., Акулич П. В., Адамович А. Л., Куц П. С., Кундас С. П. Моделирование неізотермического тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах при периодическом микроволновом нагреве. *Инженерно-физический журнал*. 2007. Т. 80, № 1. С. 3–11.
6. Анфиногентов В. И., Ганиева С. Р. Математическое моделирование СВЧ нагрева вязких жидкостей в трубопроводе. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014. Т. 17, № 2. С. 123–126.
7. Доценко О. А., Вагнер Д. В., Кочеткова О. А. Функциональные радиоматериалы для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2013. Т. 56, № 8/2. С. 260–262.
8. Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 6. С. 3–38.
9. Ключник А. В., Пирогов Ю. А., Солодов А. В. Методические аспекты исследования стойкости интегральных микросхем в электромагнитных полях импульсного радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2010. № 8. С. 1–27.
10. Козырев А. А., Горин Д. А., Кособудский И. Д., Микаелян Г. Т. Перспективы использования полимерных и нанокompозитных материалов в твердотельной электронике. *Нано- и микросистемная техника*. 2010. № 3. С. 9–23.
11. Михайлин Ю. А. *Конструкционные полимерные композиционные материалы*. Санкт-Петербург: Научные основы и технологии, 2008.
12. Дементьев Ю. В., Каплун В. Г., Кучеров Ю. С., Сытник А. Ф. Влияние длины волны внешнего СВЧ излучения на стойкость элементной базы радиоэлектронной аппаратуры. *Радиотехника*. 1996. № 2. С. 125–126.
13. Бартенев Г. М., Зеленев Ю. В. *Физика и механика полимеров*. Москва: Высшая школа, 1983.
14. Кузнецов Г. В., Белозерцев А. В. Численное моделирование температурных полей силовых транзисторов с учетом разрывов коэффициентов переноса. *Известия Томского политехнического университета*. 2005. Т. 308, № 1. С. 150–154.

15. Антипин В. В., Годовицын В. А., Громов Д. В., Раваев А. А. Дegradaция малошумящих СВЧ полевых транзисторов с затвором Шотки на арсениде галлия при воздействии мощных импульсных микроволновых помех. *Радиотехника*. 1994. № 8. С. 34–38.
16. Кузнецов Д. В. Анализ деградационных процессов, возникающих в чувствительных элементах радиоэлектронной аппаратуры под влиянием мощных электромагнитных излучений. *Измерительная и вычислительная техника в технологических процессах*. 2013. № 2 (43). С. 101–107.
17. Xinhai Y., Changchun C., Xingrong R., Xi X., Liu Y. Temperature dependence of latch-up effects in CMOS inverter induced by high power microwave. *J. Semiconductors*. 2014. Vol. 35, No. 8. Pp. 084011-1–084011-6.
18. Normand E. Single-event effects in avionics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1996. 43 (2, Part 1). Pp. 461–474.
19. Карташов Э. М., Цой Б., Шевелев В. В. *Структурно-статистическая кинетика разрушения полимеров*. Москва: Химия, 2002.
20. Levinshstein M. E., Ivanov P. A., Mnatsakanov T. T., Palmour J. W., Das M. K., Hull B. A. Self-heating and destruction of high-voltage 4h-sic rectifier diodes under a single short current surge pulse. *Semiconductors*. 2008. Vol. 42, No. 2. Pp. 220–227.
21. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment. *Russ. Microelectron.* 2008. No. 2. Pp. 131–138.
22. Анфиногентов В. И., Гараев Т. К., Морозов Г. А. Об одной задаче теории СВЧ нагрева диэлектриков. *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2002. № 3. С. 21–22.
23. Рикенглаз Л. Э. К теории нагрева диэлектриков мощными электромагнитными полями. *Инженерно-физический журнал*. 1974. Т. 27, № 6. С. 1061–1068.
24. Некрасов П. Б., Рикенглаз Л. Э. К теории адиабатического нагрева СВЧ полем диэлектрика с коэффициентом затухания, зависящим от температуры. *ЖТФ*. 1973. Т. 43, № 4. С. 694–697.
25. Рикенглаз Л. Э. К теории распространения СВЧ электромагнитных полей в диэлектриках с малыми потерями. *ЖТФ*. 1974. Т. 44, № 6. С. 1125–1128.
26. Анфиногентов В. И. Математические модели СВЧ нагрева диэлектриков конечной толщины. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2006. Т. 9, № 1. С. 78–83.
27. Николенко А. С. Математическая модель распространения электромагнитных волн в нанокompозитах на основе магнитных нанопроволок. *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2013. № 4 (28). С. 147–161.
28. Patankar S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Hemisphere, 1980.
29. Aparna K., Basak T., Balakrishnan A. R. Role of metallic and composite (ceramic-metallic) supports on microwave heating of porous dielectrics. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007. Vol. 50. Issues 15–16. Pp. 3072–3089.
30. Klayborworn S., Pakdee W., Rattanadecho P., Vongpradubchai S. Effects of material properties on heating processes in two-layered porous media subjected to microwave energy. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2013. Vol. 61, Issue 1. Pp. 397–408.
31. Калганова С. Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы. *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2006. Т. 1, № 1. С. 90–95.
32. Аксенов А. А., Жлуктов С. В., Кудимов Н. Ф., Сон Э. Е., Таран М. Д., Третьякова О. Н., Шишаева А. С. О моделировании сложного теплообмена в силовых трансформаторах большой мощности. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013. № 2. С. 131–140.
33. Беспалов В. Я., Мошинский Ю. А., Цуканов В. И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя. *Электричество*. 2003. № 4. С. 20–26.
34. Van Duijsen P., Bauer P., Leuchter J. Thermal models for semiconductors. *14th Int. Power Electronics and Motion Control Conf. (EPE/PEMC)*. 2010. Vol. 1. Pp. 23–28.
35. Бородин А. И., Иванова А. А. Моделирование температурного поля непрерывнолитого слитка с определением положения границы фазового перехода. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 2. С. 492–497.
36. Булычев А. В., Ерохин Е. Ю., Поздеев Н. Д., Филичев О. А. Тепловая модель асинхронного двигателя для цепей релейной защиты. *Электротехника*. 2011. № 3. С. 26–30.
37. Jong E. C. W., Ferreira J. A., Bauer P. Thermal design based on surface temperature mapping. *Power Electron. Lett., IEEE*. 2005. Vol. 3. Pp. 125–129.
38. Власов А. Б. Оценка теплового состояния электрической машины на основе количественной термографии. *Электротехника*. 2012. № 3. С. 13–18.
39. Мартюшев С. Г., Мирошник И. В., Шерemet M. A. Численный анализ пространственных нестационарных режимов сопряженного конвективно-радиационного теплопереноса в замкнутом объеме с источником энергии. *Инженерно-физический журнал*. 2014. Т. 87, № 1. С. 119–128.
40. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. On the possibility of controlling thermal conditions of a typical element of electronic equipment with a local heat source via natural convection. *Russ. Microelectron.* 2010. No. 6. Pp. 427–442.
41. Кузнецов Г. В., Кравченко Е. В. Анализ деструкции полимерного материала изделий электронной техники в условиях пространственной неоднородности температурных полей. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19, № 3. С. 4–12.
42. Kuznetsov G. V., Kravchenko E. V. Influence of polymer aging on reliability indices of a typical printed-circuit assembly of radioelectronic equipment. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2007. Vol. 80, No. 5. Pp. 1050–1054.



43. Kravchenko E. V., Kuznetsov G. V. Prediction of power semiconductors devices reliability working in cyclic mode. *EPJ Web of Conferences*. 2014. Vol. 76. Pp. 01014.
44. Дульнев Г. Н. *Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре*. Москва: Высшая школа, 1984.
45. *Справочник по электротехническим материалам в 3-х томах*. Под ред. Корицкого Ю. В. Москва: Энергия, 1974. Т. 1.
46. Бердышев А. В., Ивойлов В. Ф., Исайкин А. В. и др. Экспериментальные исследования воздействия СВЧ импульсов на содержащие интегральные микросхемы радиоэлектронные устройства. *Радиотехника*. 2003. № 6. С. 85–88.
47. Грибский М. П., Ахрамович Л. Н., Григорьев Е. В. и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти. *Радиоэлектроника и информатика*. 2006. Т. 35, № 4. С. 15–17.
48. Грибский М. П., Григорьев Е. В., Старостенко В. В. и др. Воздействие импульсных электромагнитных полей на современные микроконтроллеры. *Прикладная радиоэлектроника*. 2006. Т. 5, № 2. С. 294–297.
49. Борисов А. А., Горбачева В. М., Карташов Г. Д., Мартынова М. Н., Прытков С. Ф. Надежность зарубежной элементной базы. *Зарубежная радиоэлектроника*. 2000. № 5. С. 34–53.
50. Suhir E. When adequate and predictable reliability is imperative. *Microelectron. Reliability*. 2012. Vol. 52, Nos. 9–10. Pp. 2342–2346.
51. Wang Y., Enachescu M., Cotofana S. D., Fang L. Variation tolerant on-chip degradation sensors for dynamic reliability management systems. *Microelectron. Reliability*. 2012. Vol. 52, Nos. 9–10. Pp. 1787–1791.